

## О ПРОФИЛИРОВАНИИ МНОГООСТВОЛЬНЫХ СКВАЖИН ПРИ ДРОБОВОМ БУРЕНИИ

В. П. РОЖКОВ

(Представлена научным семинаром кафедры техники разведки)

Одним из прогрессивных методов повышения технико-экономической эффективности проходки скважин является многоствольное бурение. При этом способе основной ствол используется многократно, поэтому значительно сокращается объем бурения по верхним непродуктивным горизонтам [1, 2].

С другой стороны, многоствольному бурению сопутствуют некоторые дополнительные затраты средств и времени (цементирование скважины, или постановка моста, поостановка клина, отбуривание от основного ствола и т. п.). Поэтому бурению многоствольной скважины должен предшествовать тщательный анализ технической возможности и экономической целесообразности проходки такой скважины. Заранее можно лишь утверждать, что экономический эффект будет тем выше, чем с большей глубины будут отбуриваться дополнительные стволы. Руководствуясь только этим общим положением, невозможно решить вопрос о целесообразности бурения конкретной скважины. Для этого необходимо иметь профиль проектной многоствольной скважины, составленный так, чтобы скважина полностью решала поставленную геологическую задачу, суммарная протяженность скважины была по возможности минимальной, а бурение — технически возможным.

Профиль многоствольной скважины зависит от используемых средств и принятой схемы бурения.

В зависимости от того, в какой последовательности отбуриваются дополнительные стволы, различают две схемы разведки многоствольными скважинами [3]. По первой схеме (рис. 1, а) первый дополнительный ствол  $C_1B_1$  зарезается в стенку уже пробуренной основной скважины  $AB$ , которой подсечено рудное тело на глубине  $H$ . После окончания первого дополнительного ствола  $C_1B_1$ , если имеются соответствующие условия, возможна проходка дополнительных стволов  $C_2B_2$ ,  $C_3B_3$ , отбуриваемых из основной скважины  $AB$ . Таким образом, при данной схеме многозабойного бурения разведка дополнительными стволами идет «снизу вверх» по восстанию рудного тела.

По второй схеме (рис. 1, б) основной ствол  $AB$  задается в точке и с начальным зенитным углом, определяемым задачей подсечения рудного тела на глубине  $H$ , и проходится до точки  $C_1$ . После этого с забоя основного ствола отбуривается дополнительная скважина  $C_1B_1$ . В случае обнаружения рудного тела на глубине  $H_1$  основной ствол отбуривается до точки  $C_2$  и проводится второй дополнительный ствол  $C_2B_2$ . В такой



же последовательности можно пройти все остальные дополнительные стволы, а затем добурить основной ствол до конечной глубины (точка  $B$ ). В данном случае разведка идет не по восстанию рудного тела, как в первом случае, а по его падению, т. е. «сверху вниз».

В качестве средств приведения ствола в заданную точку могут быть использованы специально созданные для этой цели снаряды и приспособления, а также явление естественного искривления скважин. При разведке по первой схеме дополнительный ствол зарезается с помощью клина; при использовании второй схемы дополнительный ствол отбуривается от основного с помощью одношарнирного отклонителя, а дальнейшая разбурка основного ствола (в зоне зарезки дополнительного) ведется с помощью длинного жесткого снаряда.

Рассмотрим профилирование многоствольных дробовых скважин при проведении их по описанным схемам и использовании описанным схемам и использовании естественного искривления. Тогда профиль дополнительного ствола, как и профиль одиночной естественно искривленной скважины, описывается дифференциальным уравнением (4).

$$K = \frac{d\Theta}{dl} = a + b\Theta,$$

где  $K$  — кривизна скважины, представляющая собой приращение зенитного угла на интервале в один метр;

$\Theta, l$  — соответственно зенитный угол и глубина скважины;

$a, b$  — параметры линии регрессии, постоянные для данного участка или месторождения в целом.

Решение этого уравнения приводит к следующим зависимостям проекций скважины от величины зенитного угла

$$X = \frac{1}{b} \{ \cos A [Ci(A + \Theta) - Ci(A + \Theta_0)] + \sin A [Si(A + \Theta) - Si(A + \Theta_0)] \}, \quad (2)$$

$$Y = \frac{1}{b} \{ \cos A [Si(A + \Theta) - Si(A + \Theta_0)] - \sin A [Ci(A + \Theta) - Ci(A + \Theta_0)] \}, \quad (3)$$

где  $X, Y$  — текущие координаты рассматриваемой точки искривленной скважины, соответствующие зенитному углу;

$Si, Ci$  — соответственно интегральный синус и интегральный косинус;

$A = \frac{a}{b}$  — величина, постоянная для данного участка или месторождения в целом.

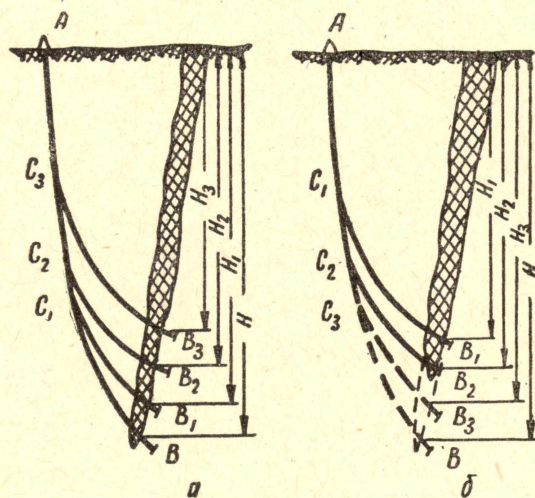


Рис. 1. Схема разведки многоствольными скважинами (по Б. И. Спиридонову): а — первая схема, б — вторая схема.  $AB$  — основной ствол;  $C_1B_1, C_2B_2, C_3B_3$  — дополнительные стволы;  $H_1, H_2, H_3, H$  — вертикальные глубины подсекаемого ископаемого.



Аналитическое профилирование по этим уравнениям возможно лишь при замене интегральных функций более простыми. Средствами точечного аппроксимирования было установлено, что при  $\Theta = 10 - 30^\circ$  имеют место соотношения

$$\text{Si}(\Theta) \approx \Theta, \quad (4)$$

$$\text{Ci}(\Theta) \approx -c + d\Theta - f\Theta^2, \quad (5)$$

где  $\Theta$  — значение зенитного угла в радианах;  
 $c, d, f$  — постоянные величины, равные соответственно 1,76; 4,25 и 2,08.

Подставив эти равенства в уравнения (2) и (3), получим приближенные уравнения проекций дробовой скважины

$$X = \frac{1}{b} [M(\Theta - \Theta_0) - f(\Theta^2 - \Theta_0^2)], \quad (6)$$

$$Y \approx \frac{1}{b} [N(\Theta - \Theta_0) + Af(\Theta^2 - \Theta_0^2)], \quad (7)$$

где

$$M = d - A(2f - 1) = 4,25 - 3,16A; \quad (8)$$

$$N = 1 - A \cdot d + 2fA^2 = 1 - 4,25A + 4,16A^2; \quad (9)$$

$\Theta_0, \Theta$  — соответственно зенитный угол забурки и зенитный угол скважины, соответствующий проекциям  $X$  и  $Y$ , в радианах.

Профилирование многоствольной дробовой скважины при бурении по схеме „снизу вверх“ (рис. 2, а) начинается с проектирования основного ствола. Методика профилирования основного ствола остается той же самой, что и при профилировании одиночной направленной скважины [4], поэтому здесь рассмотрим только проектирование дополнительных стволов.

Основной задачей при расчете профиля дополнительного ствола является определение места его забурки. Точка зарезки легко определяется, если известны зенитный угол в точке подсечения рудного тела  $\Theta_r$  и зенитный угол основного ствола в точке зарезки дополнительного  $\Theta_3$ . Для определения этих углов можно использовать вытекающие из рис. 2, а условия

$$H_B = X_{\text{осн}} + X_{\text{доп}}, \quad (10)$$

$$H_r = Y_{\text{осн}} + Y_{\text{доп}}, \quad (11)$$

$$\Theta_i = \Theta_3 + \omega, \quad (12)$$

где  $H_B, H_r$  — расстояние от точки  $B_1$  до устья (точка  $O$ ) соответственно по вертикали и горизонтали,

$X_{\text{осн}}, X_{\text{доп}}$  — вертикальные проекции участков  $OA$  основного ствола и дополнительного ствола  $AB_1$  соответственно;

$Y_{\text{осн}}, Y_{\text{доп}}$  — горизонтальные проекции тех же участков;

$\Theta_3, \Theta_i$  — зенитные углы в точке забурки дополнительного ствола соответственно у основного и дополнительного стволов;

$\omega$  — угол скоса клина.

Действительно, выразив в уравнениях (10) и (11) проекции с помощью равенств (6), (7) и (12) через зенитные углы, получим систему из двух уравнений

$$bH_B = 2f\omega\Theta_3 + M(\Theta_r - \Theta_0 - \omega) - f(\Theta_r^2 - \Theta_0^2 - \omega^2),$$

$$bH_r = -2f\omega A\Theta_3 + N(\Theta_r - \Theta_0 - \omega) - Af(\Theta_r^2 - \Theta_0^2 - \omega^2),$$



откуда легко получить искомые зависимости;

$$\Theta_{\Sigma} = \frac{b(AH_B + H_r) + A(1-f)(\Theta_B^2 + \omega^2)}{1 + A^2},$$

$$\Theta_r = \Theta_{\Sigma} + \Theta_0 + \omega,$$

$$\Theta_3 = \frac{bH_B + f(\Theta_r^2 - \Theta_0^2 - \omega^2) - M\Theta_{\Sigma}}{2\omega f},$$

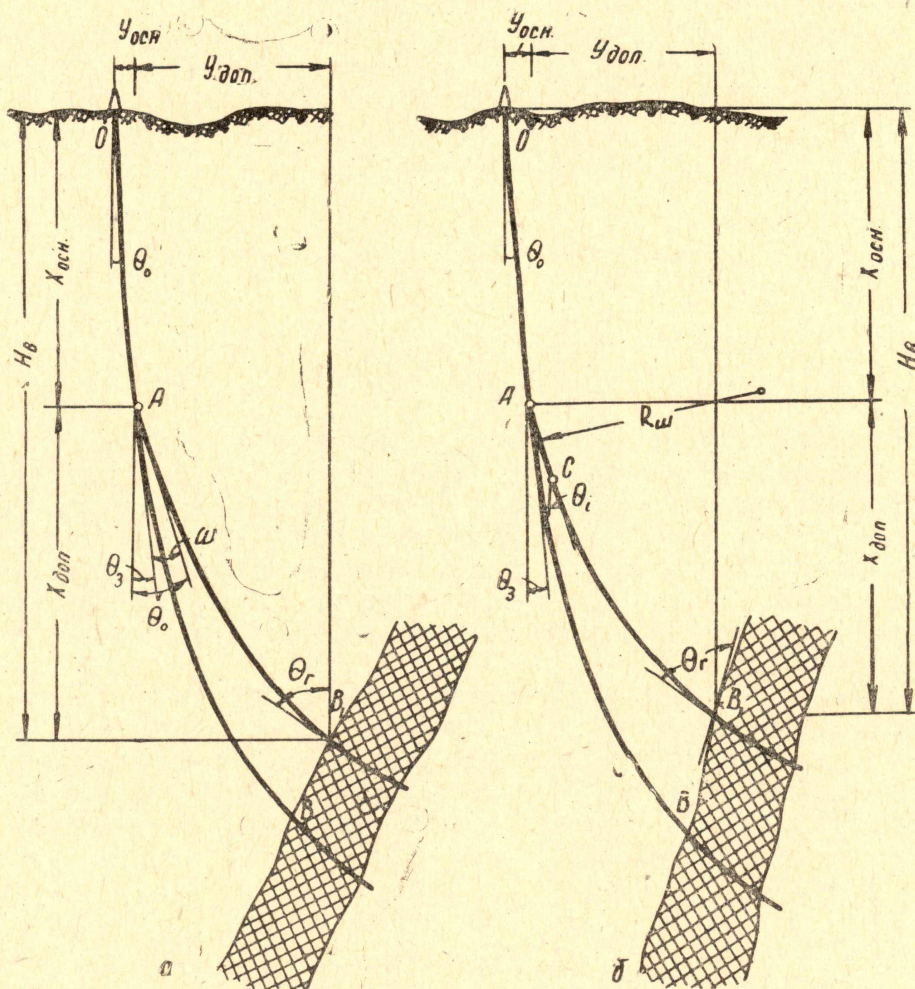


Рис. 2. Схемы многозабойных скважин: а — при отбуривании дополнительного ствола с помощью клина; б — при бесклиновом способе отбурки дополнительного ствола (с помощью одношарнирного отклонителя).  $H$  — глубина точки подсечения по вертикали;  $X_{осн}$ ,  $X_{доп}$  и  $Y_{осн}$ ,  $Y_{доп}$  — вертикальные и горизонтальные проекции участка  $OA$  основного ствола и дополнительного  $AB$ ;  $\Theta_3$ ,  $\Theta_i$  — зенитные углы в точке забурки дополнительного ствола, соответственно, у основного и дополнительного

Подставив в эти исходные зависимости некоторые числовые величины, получим окончательно:

$$\Theta_{\Sigma} = \frac{b(H_r + bH_B) - 1,08A(\Theta_0^2 + \omega^2)}{1 + A^2}, \quad (13)$$

$$\Theta_r = \Theta_{\Sigma} + \Theta_0 + \omega, \quad (14)$$

$$\Theta_3 = \frac{bH_B + 2,08(\Theta_r^2 - \Theta_0^2 - \omega^2) - M \cdot \Theta_{\Sigma}}{4,16\omega}, \quad (15)$$

где  $M = 4,25 - 3,16A$ ,



$\Theta_z$  — суммарное отклонение дополнительного ствола от начального направления основного ствола за счет естественного искривления (без учета отклонения за счет клина).

Из схемы многоствольной скважины (рис. 2, а), дополнительный ствол которой зарезается с помощью клина, совершенно очевидны следующие условия:

- 1)  $\Theta_z > \Theta_0$  — зарезка дополнительного ствола (с точки зрения траекторий естественно искривленных скважин) вполне возможна;
- 2)  $\Theta_z = \Theta_0$  — дополнительный ствол превращается в самостоятельную скважину, которая имеет общее устье с ранее пробуренной скважиной (т. е. „основным“ стволом);
- 3)  $\Theta_z < \Theta_0$  — дополнительный ствол превращается в совершенно самостоятельную скважину.

В случаях 2 и 3 профилирование „дополнительной“ скважины необходимо производить по методике, разработанной для одиночной скважины [4].

Для определения места зарезки дополнительного ствола можно получить зависимость из дифференциального уравнения (1) путем его интегрирования и решения относительно длины скважины. После указанных операций будем иметь

$$L_z = \frac{1}{b} \ln \left( \frac{A + \Theta_z}{A + \Theta_0} \right) = \frac{2,3}{b} \lg \left( \frac{A + \Theta_z}{A + \Theta_0} \right), \quad (16)$$

где  $L_z$  — глубина постановки клина по основному стволу, в метрах;  
 $b$  — интенсивность набора кривизны, в 1/метр;  
 $A, \Theta_0, \Theta_z$  — в градусах или радианах.

Итак, профилирование дополнительного ствола сводится к определению с помощью геологического разреза расстояния по вертикали и горизонтали от точки подсечения до устья основного ствола (т. е.  $H_v$  и  $H_r$ ), определению по формулам (13), (14) и (15) суммарного отклонения ( $\Theta_z$ ), зенитного угла в точке подсечения рудного тела ( $\Theta_r$ ) и зенитного угла основного ствола в точке зарезки дополнительного ствола ( $\Theta_z$ ), а затем по формуле (16) — глубины постановки клина.

Профилирование многоствольной дробовой скважины при бурении по схеме «сверху вниз» (рис. 2, б) можно свести к только что рассмотренному случаю.

При бурении по схеме «сверху вниз» зарезка дополнительного ствола производится одношарнирным отклонителем. Практика бурения с этим отклонителем показывает, что с его помощью можно достичь кривизны от 0,2 до 0,45 град/м, при среднем значении  $K = 0,3$  град/м, т. е. скважина искривляется в среднем по радиусу, равному 190 м.

Для случая зарезки дополнительного ствола с помощью одношарнирного отклонителя важно знать, на каком интервале необходимо применять этот отклонитель, чтобы дополнительный ствол полностью отошел от направления основного ствола. Для определения этого интервала воспользуемся рис. 3. Непосредственно из рисунка следует, что центральный угол  $\alpha$ , соответствующий определяемому интервалу  $l_z$ , будет равен

$$\alpha = \arccos \left( \frac{R - \frac{d}{2}}{R + \frac{d}{2}} \right), \text{ град.}, \quad (17)$$



где  $R = \frac{57,3}{K} = 190 \text{ м}$  — радиус искривления скважины при бурении одношарнирным отклонителем;  
 $d$  — диаметр дополнительного ствола.

Тогда искомый интервал  $l_3$  определяется, как

$$l_3 = \frac{2\pi(R+d)\alpha}{360} = \frac{\alpha(R+d)}{57,3}. \quad (18)$$

Допустим, что конечный диаметр дополнительного ствола равен 112 мм, тогда при  $R = 190 \text{ м}$  центральный угол будет равен  $1^\circ 58'$ ; а искомый интервал зарезки дополнительного ствола  $l_3 = 6,5 \text{ м}$ .

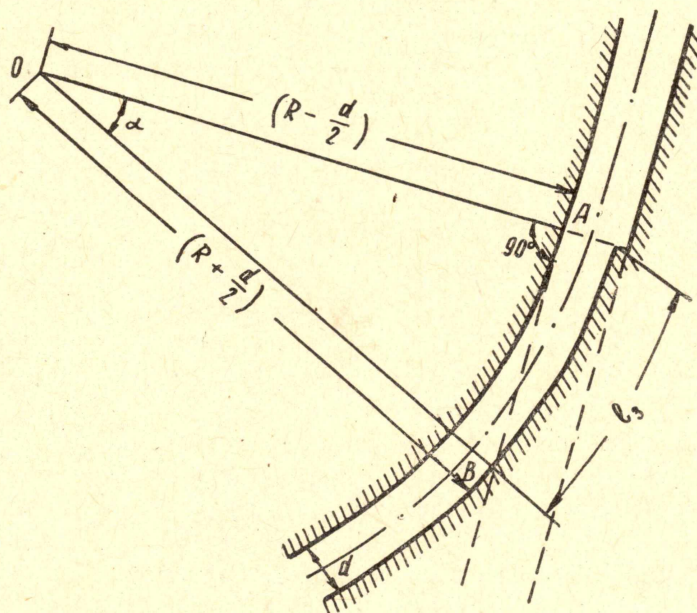


Рис. 3. Схема зарезки дополнительного ствола с помощью одношарнирного отклонителя

Таким образом, как показывают расчеты, в большинстве случаев величина интервала зарезки дополнительного ствола мала по сравнению с остальной длиной дополнительного ствола, поэтому (с небольшой погрешностью) при профилировании можно считать, что скважина и на интервале зарезки искривляется по естественному профилю, а сама зарезка производится с помощью клина с углом скоса

$$\omega_3 = K \cdot l_3, \quad (19)$$

где  $K$  — средняя кривизна скважины при бурении одношарнирным отклонителем, в град/м;

$l_3$  — длина интервала зарезки дополнительного ствола с помощью одношарнирного отклонителя. Ее можно рассчитать по формулам (17), (18) или принять из опыта.

Необходимо также отметить, что чем больше будет принят «эквивалентный угол скоса клина»  $\omega_3$ , тем с большей глубины можно производить зарезку дополнительного ствола и, следовательно, тем экономичнее многоствольное бурение. С другой же стороны, надо иметь в виду, что чем больше искривление скважины на небольших участках, тем в более трудных условиях придется работать бурильным трубам.



После определения по формуле «эквивалентного угла скоса» дальнейшие расчеты по профилированию можно вести, как для предыдущего случая, т. е. по формулам (13) — (16).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С.С. Сулакшин. Проблема направленного бурения разведочных скважин. Изв. вузов—Геология и разведка, №5, 1962.
  2. А. Г. Калинин. Искривление буровых скважин. Гостоптехиздат, М., 1963.
  3. Б. И. Спиридонов. К методике бурения многоствольных скважин. Изв. вузов—Геология и разведка, №5, 1962.
  4. В. П. Рожков. Некоторые методы профилирования скважин при дробовом бурении. Изв. ТПИ, т. 151, 1966.
-